

補助事業番号 2021M-181

補助事業名 2021年度噴霧燃焼内における液滴間干渉度の推定式提案に関する補助事業

補助事業者名 安藤詩音

## 1 研究の概要

直径の異なる正デカン液滴対の冷炎・熱炎点火挙動について調査した。冷炎の発生時刻の判定はLSTMとオートエンコーダを組み合わせた深層学習手法によって検知した。結果、液滴径や雰囲気条件を様々に変化させることで、小さい液滴付近で生じた冷炎が大きい液滴周辺の熱発生・冷炎点火を誘起したり、あるいは両液滴が独立的に冷炎・熱炎点火したりするなど様々な点火モードが観察された。

## 2 研究の目的と背景

冷炎および二段点火に関する知見の取得はエンジン内における炭化水素燃料噴霧の点火を制御する上で重要である。一方で、単一液滴や液滴対燃焼は噴霧燃焼や予混合燃焼に関する基礎的な知見を多く与えてくれる。ゆえに、炭化水素燃料液滴対の二段点火に関して、実験および数値解析によって多く調査されてきた。しかしながら、ほとんどが液滴径の等しい液滴対を対象としており、液滴径が異なる液滴対については十分に調査されていない。本研究は液滴対が異なることによる、非対称的な熱・物質輸送による冷炎・二段点火への影響を明らかにすることを目的として、初期液滴径の異なる正デカン液滴対の冷炎・熱炎点火挙動を調査した。熱炎と異なり冷炎は輝炎を伴わないため、マイケルソン干渉計により液滴対周囲の気体密度変動を可視化し、干渉縞画像を取得した。干渉縞の歪みを畳み込みLSTMオートエンコーダにより解析し、前時刻の画像からの変動を正常度として評価した。正常度を用いて冷炎点火時刻を自動検知した。雰囲気圧力は0.3MPaに固定し、雰囲気温度は600から650Kに変化させた。液滴径は大きい方を1.0mmに固定し、小さい方を0.4から1.0mmまで変化させた。液滴間隔は2mmと4mmで実施した。雰囲気組成については酸素体積分率を21(乾燥空気)、30、40および50%に変化させた。

## 3 研究内容

### (1) 液滴対点火モードの分類

(URL: <https://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~esl/HP2021Ver/spray/#page-content>)

初めに、GPUを使用した深層学習用の環境を構築した。その後、手始めとしてLSTM+オートエンコーダの組み合わせによる点火モードの学習を、後にオートエンコーダの応用であるVAE(変動オートエンコーダ)による学習を実施した。過去に実施した点火実験のデータ(正デカン液滴対, 0.3MPa, 600-650K)の実験結果を学習・検証データとして用いた。結果、点火時刻については冷炎点火モードの把握が可能となった。

初期液滴径を二つの液滴で異にすることで、小さい方の液滴から大きい方の液滴への冷炎点火の誘起が確認された。しかし、液滴間隔が大きく、雰囲気温度が高い場合は誘起されず、二

液滴は独立に冷炎点火した。これは雰囲気増大に伴い、冷炎点火遅れが短縮化されて、燃料蒸気層が大きい液滴周りに発達するよりも以前に大きい液滴周りで冷炎点火したためと考えられる。

熱炎についても、小さい液滴から大きい液滴への誘起が確認された(図1)。ただし、液滴間隔が大きく、小さい方の液滴径が小さい場合、小さい液滴周りで熱炎点火する前あるいはほぼ同時に小さい液滴の蒸発が完了するため、大きい方の熱炎点火は誘起されなかった。

また、実機への応用には、熱炎点火が重要であることから、熱炎点火に関する実験データが必要と判明した。

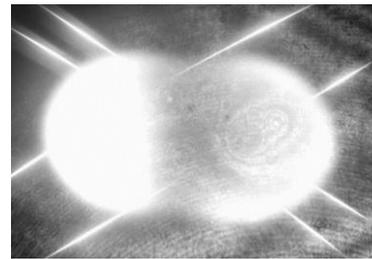


図1 二液滴の熱炎点火

## (2) 点火モード分類境界の把握

(URL: <https://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~esl/HP2021Ver/spray/#page-content>)

(1)の結果から、小さい液滴が大きい液滴の冷炎や熱炎の点火を誘起する・しないによって様々な点火モードが観察されることが明らかとなった。そして、その点火モードは液滴間隔のみならず、雰囲気温度や圧力、初期液滴径など様々な因子によって決定されることが明らかとなった。点火モードを何か一つのパラメータによって整理するため、低速流れにおける反応性流体の支配方程式をスケーリングし、支配因子の抽出を行った。検討の結果、物理的な輸送速度と化学反応速度の比であるダムケラー数が支配因子として重要であることが判明した。ただし、ダムケラー数の定量的な把握には実験データでは不十分であり、数値解析を要するため、今後の課題として残った。

## (3) 液滴対自発点火実験の実施

(URL: <https://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~esl/HP2021Ver/spray/#page-content>)

(1)では冷炎発生後に熱炎が発生する、二段点火の条件で実施したデータによる学習であった。雰囲気圧力や温度、組成を変化させることで、冷炎のみあるいは熱炎のみなどさらに多くの点火モードが観察されるという予測の下、本事業では組成を変化させることによる点火モードへの影響に焦点を当てた。大気圧下で酸素濃度(vol%)を21%から50%に変化させたところ、700K以上でないと熱炎は発生せず、それ以下では熱炎も冷炎も発生しなくなった。酸素濃度の増大は冷炎を引き起こす低温酸化反応を促進するため、冷炎はより広範囲の実験条件で観察されるとの事前の予測と異なる結果であり、今後、反応解析を通して反応経路への雰囲気組成の影響を解明する

## 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本事業により、液滴の点火モードには種々の条件(雰囲気組成や液滴径、液滴間距離)が影響をおよぼすことが明らかとなった。一方で、従来は単一の液滴を対象とした研究が多く、干渉効

果については十分に調査されていないかった他、液滴対を対象としていても本事業よりも高温雰囲気を取った、熱炎点火のみに着目した研究が主であった。本研究は初めて冷炎にも焦点を当てた研究であり、今後より実機に近い噴霧燃焼解析を実施する際に低温酸化反応の考慮の重要性を示したものと見える。本研究の結果を基に、将来的に噴霧燃焼モデルを改善することで、燃焼シミュレーションの高精度化、そして燃焼器開発の革新に貢献すると期待する。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

代表者はこれまで単一液滴の燃焼挙動におよぼす、雰囲気や組成の影響を実験および数値計算を用いて調査してきた。今後も液滴燃焼中に生じる燃焼生成物(NO<sub>x</sub>やすすなどの環境負荷物質)の生成メカニズムを明らかにしていく予定である。一方で、本研究は液滴の燃焼の初期段階である点火過程に着目した研究である。そこでは、準定常的に燃焼する期間では重要とされなかった低温酸化反応の影響が顕著となるなど、点火特有の挙動が観察された。本研究の知見とこれまでの研究結果を纏めることで液滴の蒸発・自発点火・燃焼に至るまでの一連の液滴燃焼挙動を包括的に把握することが可能となる。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

特に無し

#### 7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

特に無し

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

特に無し

#### 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名 : 九州大学大学院工学研究院  
(キョウシュウダイガクダイガクインコウガクケンキュウイン)

住 所 : 〒819-0395  
福岡県福岡市西区元岡744

担 当 者 : 助教 安藤 詩音(アンドウ シオン)

担 当 部 署 : 機械工学部門(キカイコウガクブモン)

E - m a i l : ando-shion@mech.kyushu-u.ac.jp

U R L : <https://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~esl/HP2021Ver/>